

省道路边菜地土壤重金属含量分布及污染评价

庞 龙,卢新卫*,巢世刚
(陕西师范大学旅游与环境学院,陕西 西安 710062)

摘 要: 采集西安市 S107 省道路边菜地土壤样品,利用 XRF 法测定土壤样品中重金属的含量,研究路边土壤中重金属的含量变化特征及污染水平。研究结果显示,路边菜地土壤中存在 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni 和 V 的累积现象。土壤重金属含量空间变化分析表明,防护林能够有效限制扩散能力强的 Pb 和 Cr 的传播范围,可阻挡通过大颗粒污染物扩散的 Cu、Zn、Mn、Ni、V 和 As 进入菜地土壤。单项污染指数评价结果显示,菜地土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni、V 单因子污染指数均在 1.0~1.7 范围内,都达到了轻度污染,其中 Pb、Cr 污染指数能达到 1.6 和 1.7,污染相对较重。路边菜地土壤重金属的综合污染指数分别为 1.9 和 1.8,污染水平为轻度。

关键词: 菜地;重金属;公路边土壤;含量;污染指数
中图分类号: S19;X833 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0203-05

Distribution of heavy metal content and pollution assessment in vegetable soil around provincial highway

PANG Long, LU Xin-wei*, CHAO Shi-gang
(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: The soil samples were collected from the vegetable field nearby S107 provincial highway of Xi'an City. The content variation and pollution level of heavy metal in these soil samples were studied by measuring the heavy metal content using the XRF method. The results indicated that: The Cu, Pb, Zn, Cr, Mn, Ni and V were accumulated in these studied soils. The spatial variation analysis of heavy metals in these soils demonstrated that the shelter forest can be effectively limited the diffusion ability and transmission range of Pb and Cr, and prevented the Cu, Zn, Mn, Ni, V and As spreading into the vegetable soils by the large particles pollutants. The assessment results of single pollution index shown that Cu, Pb, Zn, Cr, Mn, Ni and V were in the range of 1.0 to 1.7, total presented light pollution. Among them, the Pb and Cr reached 1.6 and 1.7, was relative heavy pollution. The integrated pollution index of heavy metals in these soil was 1.9 and 1.8, respectively. The pollution level was light.

Keywords: vegetable; heavy metal; field nearby provincial highway; content; pollution index

蔬菜质量安全作为食品质量安全的重要组成部分,直接关系到人们的身体健康。对于蔬菜生产来说,产地环境是影响蔬菜质量安全的重要因素。蔬菜种植过程中,由于化肥、农药的大量使用,以及污水灌溉、大气灰尘颗粒沉降等原因,菜地土壤已呈现出不同程度的重金属累积现象^[1-3]。公路交通作为地表环境中重金属污染物的主要排放源之一,对其沿线周边的菜地土壤产生了不同程度的重金属污染。研究表明,道路交通会显著影响路域周边土壤环境,机动车尾气排放、轮胎和其它零部件老化和磨损,机油和燃油泄露、路面磨蚀和货物抛撒等,成为了道路污染的重要来源,造成了路边土壤 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd、Ni、As 等重金属污染^[4-5]。由于各地自然环境的差异,道路状况、交通工具类型、交通流量、运营年限、路边绿化等因素的不同,道路交通会对周边土壤环境质量造成不同的影响,因此,研究各地不同交通要道周边土壤环境质量具有重要意义。

本研究以西安 S107 省道路边菜地土壤为对象,研究土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni、V 和 As 等重金属元素的含量分布特征,并利用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价土壤中重金属的污染水平,旨在揭示该区道路交通对周边菜地土壤重金属

收稿日期:2013-06-13
基金项目:国家自然科学基金(41271510);中央高校基本科研业务费项目(GK201305008)
作者简介:庞 龙(1987—),男,新疆塔城人,硕士研究生,研究方向为环境评价与治理。E-mail: panglong@stu.snnu.edu.cn。
*通信作者:卢新卫,教授,博士,博导。E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn。

的影响,为公路规划和公路周边菜地土壤重金属污染的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于西安市长安区 S107 省道附近,南依秦岭。气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.0℃~13.7℃,年降水量 522~720 mm,年日照时数 1 646~2 115 h,常年主导风向为东北风^[6]。S107 省道长安区段为东西走向,双向四车道,中间无隔离带。调查段平均每分钟车流量约为 20 辆,其中小轿车约占 3/4。路边有宽约 19 m 左右不连续的防护林,树高约 3~5 m,植被种类为红叶李、柳树、女贞和小白杨等。2012 年 11 月经过实地考察后,在道路南侧选择有防护林(S1)和无防护林(S2)的两块菜地作为调查对象,两块均采用地下水灌溉,附近无其它工业污染源。

1.2 样品采集、处理与实验分析

根据菜地面积大小采用网格布点法进行土壤样品采集。在 S1 菜地中布设三条垂直于公路,且间隔在 13 m 左右的采样线,每条采样线上于距离机动车道 20、30、40、50 m 处布设表层土壤样品采集点。S2 地块布设两条采样线,每条采样线上采样点的布设同 S1。每个采样点为 1 m×1 m 的正方形,利用五点法采集 0~20 cm 的表层土壤均匀混合,经四分法缩分后取 1 kg 样品装入聚乙烯袋中带回实验室。采样时利用 GPS 进行精确定位。所有样品于实验室内自然风干。风干土壤样品经木棒破碎处理,过 20 目尼龙筛,剔除石块、植物残体等杂物。处理好的样品密封于聚乙烯样品袋中。

取大约 20 g 风干土壤样品利用振动研磨使其粒径小于 200 目(0.075 μm),称取研磨后的土壤样品 4 g,采用压样机制成硼酸衬底镶边的圆形片状的待测样品,然后利用 PW2403 型 X-Ray 荧光光谱仪(XRF,荷兰帕纳科生产)测定土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni、V 和 As 的含量。测定过程中利用国家标准物质样品 GSS2 和重复样进行质量控制^[7]。

称取过 20 目尼龙筛的土壤样品 10.00 g 利用 MS2 型磁化率仪(英国 Bartington 公司)测定低频磁化率(χ_{LF})、高频磁化率(χ_{HF})以及频率磁化率(χ_{FD})^[8]。土壤 pH 值和电导率(EC)分别利用 PHSJ-4A 型 pH 计和 DDSJ-308A 型电导率仪测定。有机质采用烧失量(LOI)测定法,称取 1.000 g 土壤样品使用马弗炉测定土壤中有机质含量。

1.3 重金属污染评价方法

本文采用常用的单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[9-10]评价土壤重金属污染水平。并选用陕西省表层土壤背景值^[11]作为评价标准。

$$P_i = C_i/S_i$$

$$P = \{[(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2}$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的污染指数; C_i 为污染物 i 的实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); $(C_i/S_i)_{\max}$ 为土壤污染中污染指数的最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染中污染指数的平均值; P 为内梅罗综合污染指数。

土壤分级标准^[10]如表 1。

表 1 土壤环境质量污染指数分级标准

Table 1 Grading standard for pollution index of soil environmental quality

单项污染指数 Single pollution index	污染程度 Pollution degree	内梅罗综合污染指数 Synthetical pollution index	污染程度 Pollution level
$P_i < 1$	清洁 Clean	$P \leq 0.7$	清洁 Clean
$1 \leq P_i < 2$	轻污染 Light	$0.7 < P \leq 1$	警戒 Warning
$2 \leq P_i < 3$	中污染 Moderate	$1 < P \leq 2$	轻污染 Light
$P_i \geq 3$	重污染 Heavy	$2 < P \leq 3$	中污染 Moderate
		$P > 3$	重污染 Heavy

2 结果与讨论

2.1 菜地土壤理化性质

S1 菜地 pH 值的范围为 5.43~6.08,平均值为 5.79。S2 菜地 pH 值的范围是 6.02~7.73,平均值为 6.84。两块菜地土壤都为弱酸性土壤。S1 和 S2 菜地土壤电导率的范围分别是 63.4~107.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 70.9~110.9 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值分别为 83.8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 91.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。两块菜地土壤烧失量(LOI)的范围分别是 4.0%~6.0%和 4.0%~4.4%,平均值分别为 4.8%和 4.2%,两块菜地的有机质含量接近。S1 菜地土壤的低频磁化率(χ_{LF})、高频磁化率(χ_{HF})和频率磁化率平均值分别为(χ_{FD}) $113.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $103.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 8.7%,S2 菜地则分别为 $179.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $161.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 10.2%。王凌青等^[12]曾对西安市东郊、东北郊、西北郊和西郊农田土壤的 pH 值和有机质含量做过研究,与其结果相比,两块菜地土壤 pH 值均低于王凌青等人所报道的西安市郊农田土壤的 pH 值(8.6),而有机质的含量则高于其研究结果(2.47%)。

2.2 菜地土壤重金属含量及分布特征

西安市 S107 省道旁菜地土壤重金属含量测试结果见表 2。如表 2 所示,S1 菜地所有土壤样品中 As 含量与部分土壤样品中 Ni 和 Zn 含量低于陕西表层土壤背景值,其余各元素在所有样品中的含量均超过陕西表层土壤相应元素背景值,具有一定累积,尤其是 Cr、Cu 和 Pb,其含量分别是背景值的 1.4

~ 2.0、1.3 ~ 1.4 和 1.5 ~ 2.0 倍。S2 菜地土壤中除部分样点 Zn 和 As 含量低于背景值外,其余各元素含量均高于陕西表层土壤背景值。两块菜地土壤重金属含量均低于王凌青所报道的西安市郊农田土壤重金属的含量^[12],这可能与王凌青等人所研究的市郊农田周边存在燃煤电厂等工业污染源,以及污水灌溉等原因有关。

表 2 西安市 S107 省道旁菜地土壤中重金属含量/(mg·kg ⁻¹)							
Table 2 Heavy metals content in vegetable soils from S107 provincial highway of Xi'an City							
元素 Element	S1			S2			陕西表层土壤背景值 Background value of surface soil in Shaanxi
	范围 Range	平均值 Mean	标准偏差 SD	范围 Range	平均值 Mean	标准偏差 SD	
Cr	88.3 ~ 127.0	103.9	10.3	98.2 ~ 107.8	103.0	3.2	62.5
Cu	26.9 ~ 29.8	28.7	1.0	27.0 ~ 31.5	29.5	1.3	21.4
Mn	641.2 ~ 691.5	667.9	16.5	716.9 ~ 774.5	763.9	19.3	557.0
Ni	27.2 ~ 30.3	28.7	0.9	32.3 ~ 36.6	34.9	1.4	28.8
Pb	32.9 ~ 41.9	35.2	2.8	27.8 ~ 30.9	29.6	1.2	21.4
V	78.0 ~ 86.8	82.7	2.8	89.8 ~ 96.0	93.2	1.9	66.9
Zn	63.9 ~ 71.1	67.3	2.5	66.2 ~ 75.2	70.3	3.0	69.4
As	5.2 ~ 7.0	6.1	0.6	9.8 ~ 12.5	11.2	1.0	11.1

图 1 给出两块菜地土壤中重金属含量的空间变化情况。由图 1 可见,两块菜地土壤中 Pb、Cu、Zn、As 和 Ni 的含量总体上表现出随距公路距离的增大而降低的趋势。S1 菜地中的 Cr 和 S2 菜地的 Mn 则随着距离的增加呈现升高的趋势。在相同距离内,S2 田块中的 Cu、Zn、As、Ni、Mn 的含量大于 S1 田块,而 Pb、Cr 的含量则小于 S1 田块。导致两块菜地各种金属含量分布特征差异的主要原因是由于交通产生的各种重金属进入公路沿线环境的方式不同。公路旁大气沉降颗粒物中约有 90% 的 Pb 依然主要来自于汽车尾气的排放^[13]。此外,轮胎摩擦和润滑油燃烧可以产生 Zn、Cd 和 Pb 等重金属,润滑油的燃烧还会产生 Cr、Cu、Ni 等重金属的污染,刹车里衬磨损会产生 Cd、Co、Cu、Sb 和 Zn 等重金属的污染^[13]。公路交通产生的这些重金属主要以大气扩散、路面溅射扬尘、路面径流等方式进入公路沿线的环境中^[14-20]。研究表明 Pb 主要以 PM10 颗粒态的形式随尾气向公路两侧扩散,PM10 颗粒扩散能力强,能够污染公路周边几百米甚至上千米的环境^[21]。S1 田块的防护林能将含 Pb 污染物在林带的阻碍下,使其扩散能力受到限制,大量累积于距公路几十米的范围内,而 S2 没有防护林的阻碍,根据李仰征等^[22]的研究结果可以推测 Pb 能够随着污染物扩散到更

远的地方大量累积,从而导致 S1 中 Pb 含量远大于 S2。李波等^[23]研究显示出 Cr 迁移能力强的特点(其断面最大值就出现在最远样点 200 m 处)。李仰征等^[22]探讨不同林带对重金属扩散防护效果差异的研究结果中也显示有防护林的地块和无防护林的地块中 Cr 含量都从 20 m 开始持续上升,在 200 m 处到达最大值,随后有防护林的地块中 Cr 含量迅速下降,而无防护林地块下降幅度较小。整个过程中虽然有防护林的地块中 Cr 含量要高于无防护林地块,但大大缩小了 Cr 的污染范围。本研究中的结果与其相似,S1 地块由于防护林的阻碍作用,在 20 m 处就开始大量累积,而 S2 地块虽然也开始累积,但累积量明显低于 S1,可以预测 Cr 对于 S2 的影响范围会远大于 S1。

Zn、Cu 等重金属通过路面扬尘扩散或地表径流进入到两侧土壤中^[13]。如表 3 中,As、Cu、Mn、Ni、V 和 Zn 之间显著相关,说明这些重金属迁移方式相似,都是通过扬尘和地表径流进入土壤。含有这些重金属的污染物粒径较大,经过防护林及其枯枝落叶的阻挡和过滤,能够进入 S1 地块的污染物相对 S2 无防护林地块会很少,这与一些学者的研究结果一致^[24-25]。

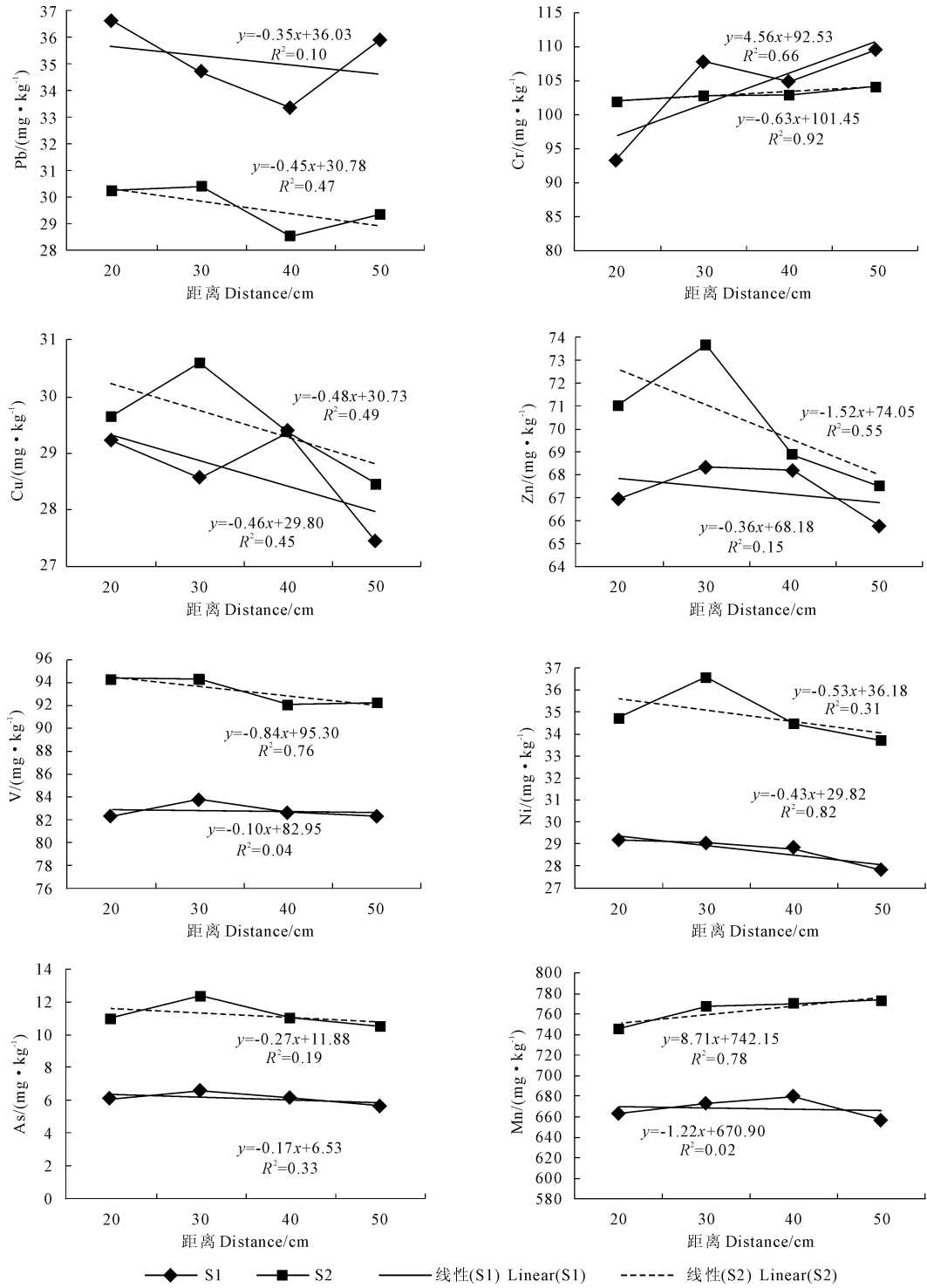


图 1 西安 S107 省道菜地 S1、S2 土壤中重金属含量

Fig.1 Heavy metals content of the vegetable soils from S1 and S2 of S107 provincial highway of Xi'an City

2.3 菜地土壤重金属污染评价

菜地土壤重金属的平均单项污染指数见表 4。由表 4 可以看出, S1 菜地中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、V 和 Zn 元素达到轻度污染, 污染程度由高到低依次为 $Cr > Pb > Cu > Mn = V > Ni = Zn > As$ 。S2 菜地中 8 种元素也都达到了轻度污染水平, 污染程度由高到低依次为 $Cr > Cu = Mn = Pb = V > Ni > Zn = As$ 。S1 和 S2

土壤重金属的综合污染指数的平均值分别为 1.9 和 1.8, 均为轻度污染。通过对比两块菜地土壤重金属的单项污染指数发现, Cr 和 Pb 单项污染指数在 S1 菜地中略大于 S2, 而 S2 菜地中 Cu、Mn、Ni 和 V 的单项污染指数均高于 S1。污染评价结果表明, S107 省道旁菜地土壤的环境质量已经受到公路交通运输的影响, 土壤中存在重金属累积的现象, 应引起重视。

同时,应进一步加强蔬菜中重金属的监测调查,以避免对人体健康造成影响。

表 3 西安市 S107 省道菜地土壤 6 元素间相关系数

Table 3 Correlation coefficients of six heavy metals in the vegetable soils from S107 provincial highway

相关性 Relevance	As	Cu	Mn	Ni	V	Zn
As	1					
Cu	0.446 *	1				
Mn	0.938 **	0.430	1			
Ni	0.954 **	0.602 **	0.930 **	1		
V	0.923 **	0.455 *	0.925 **	0.922 **	1	
Zn	0.627 **	0.776 **	0.608 **	0.712 **	0.692 **	1

注: ** 在 0.01 水平上显著, * 在 0.05 水平上显著。
Note: ** and * mean significance at the levels of 0.01 and 0.05, respectively.

表 4 西安 S107 省道菜地土壤重金属单项污染指数

Table 4 Single pollution index of heavy metals in vegetable soil from S107 provincial highway of Xi'an City

元素 Element	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn	As
S1	1.7	1.3	1.2	1.0	1.6	1.2	1.0	0.5
S2	1.6	1.4	1.4	1.2	1.4	1.4	1.0	1.0

3 结 论

1) 西安 S107 省道旁菜地土壤中 Cr、Cu、Mn、Pb 和 V 的含量均超过了陕西表层土壤背景值。有防护林菜地和无防护林菜地中,Cr 和 Cu 含量接近,有防护林菜地土壤中 Pb 含量高于无防护林菜地土壤,Mn、Ni、V、Zn 和 As 在无防护林菜地土壤中含量相对较高。路边菜地土壤中 Pb、Cu、Zn、As 和 Ni 的含量总体表现出随距公路距离的增大而降低的趋势。

2) 菜地土壤中 As、Cu、Mn、Ni、V、Zn 显著相关,说明这些重金属来源相似,主要通过粒径较大的扬尘和地表径流进入土壤。Pb 和 Cr 的扩散能力较强,Pb 主要通过尾气排放进入土壤。防护林能够有效地阻挡大颗粒污染物进入土壤,限制较小颗粒污染物和扩散能力强的污染物的扩散范围。

3) 单项污染指数评价结果显示路边菜地中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、V 和 Zn 均达到轻度污染,其中 Cr 和 Pb 的污染程度相对较大。路边菜地土壤重金属的综合污染水平为轻度。公路交通已经对周边菜地土壤造成一定影响,加强土壤及蔬菜中重金属的监测极为必要。

参 考 文 献:

[1] 李 静,谢正苗,徐建明,等.杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J].生态环境,2003,(3):277-280.

[2] 杨 磊,万红友.郑州市城郊菜地土壤重金属环境质量评价[J].河南农业科学,2011,(12):84-87.

[3] 王 军,陈振楼,王 初,等.上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J].环境科学,2007,(3):647-653.

[4] 冯效毅,刘春阳.公路周边土壤重金属污染及植物修复[J].污染防治技术,2011,(5):17-21,66.

[5] 邵 莉,肖化云,吴代赦,等.交通源重金属污染研究进展[J].

地球与环境,2012,(3):445-459.

[6] 西安市统计局.西安市 2010 统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2010.

[7] Lu Xinwei, Wang Lijun, Li L Y, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, North west China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,173:744-749.

[8] Lu Xinwei, LI L Y, Wang Lijun, et al. Contamination assessment of mercury and arsenic in roadway dust from Baoji, China[J]. Atmospheric Environment, 2009,43:2489-2496.

[9] 李祚泳,丁 晶,彭荔红.环境质量评价原理与方法[M].北京:化学工业出版社,2004:128-135.

[10] 李晓雪,卢新卫,任春辉,等.宝鸡二电厂周边农田土壤重金属污染特征及评价[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):220-254.

[11] 国家环境保护局,中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:87-90,330-496.

[12] 王凌青,卢新卫,贾晓丹.西安市郊农田土壤环境地球化学研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(3):113-117.

[13] 冯金飞.高速公路沿线农田土壤和作物的重金属污染特征及规律[D].南京:南京农业大学,2010.

[14] Kummer U, Pacyna I, Pacyna E, et al. Assessment of heavy metal releases from the use phase of road transport in Europe[J]. Atmospheric Environment, 2009,43(3):640-647.

[15] Wong C S C, Li X D, Zhang G, et al. Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2003,37(6):767-776.

[16] Al-Khlaifat A L, Al-Khashman O A. Atmospheric heavy metal pollution in Aqaba city, Jordan, using *Phoenix dactylifera* L. leaves[J]. Atmospheric Environment, 2007,41(39):8891-8897.

[17] Cao T, An L, Wang M, et al. Spatial and temporal changes of heavy metal concentrations in mosses and its indication to the environments in the past 40 years in the city of Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(21): 5390-5402.

[18] Monaci F, Moni F, Lanciotti E, et al. Biomonitoring of airborne metals in urban environments: new tracers of vehicle emission, in place of lead[J]. Environmental Pollution, 2000,107(3):321-327.

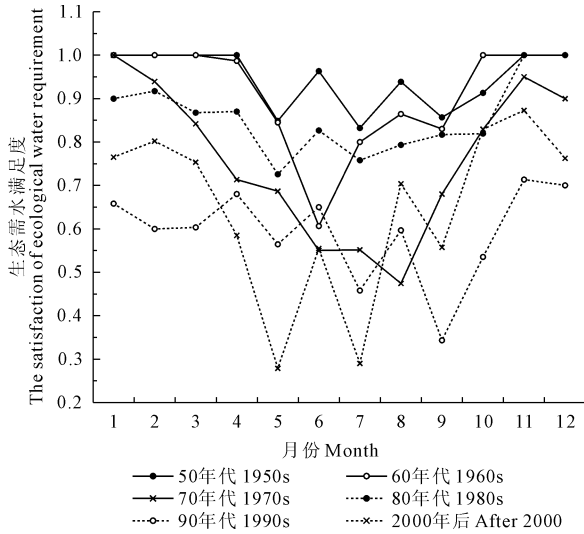


图 2 咸阳断面生态需水满足度分布图
Fig.2 Distribution of ecological water requirement satisfaction in Xianyang Section

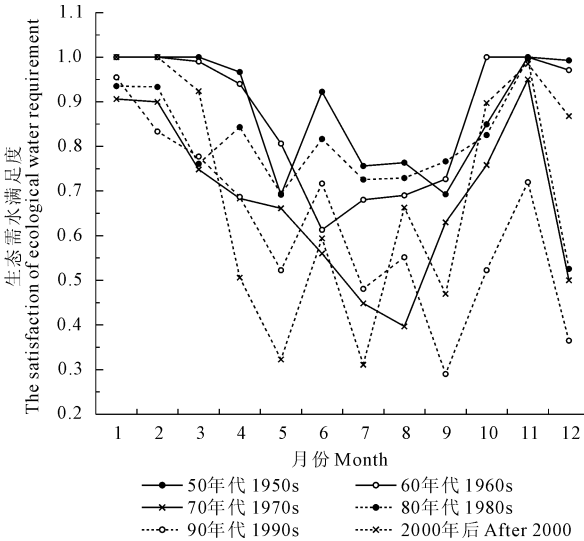


图 3 华县断面生态需水满足度分布图
Fig.3 Distribution of ecological water requirement satisfaction in Huaxian Section

参 考 文 献:

[1] 王西琴,刘 斌,张 远.环境流量界定与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2010,33:84-110.

[2] 钟华平,刘 恒,耿雷华.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展,2006,17(3):430-434.

[3] 杨 涛,陈永勤,陈 喜,等.复杂环境下华南东江中上游流域筑坝导致的水文变异[J].湖泊科学,2009,21(1):135-142.

[4] Ruth Mathews, Richter B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting[J]. American Water Resources Association, 2007,43(6):1400-1413.

[5] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A Spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998,14:329-340.

[6] 张洪波,辛 琛,王义民,等.宝鸡峡引水对渭河水文规律及生态系统的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(4):226-234.

[7] Richter B D, Baumgartner J V, Powll J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem[J]. Conservation Biology, 1996,10:1163-1174.

[8] 张新华,李红霞,肖玉成,等.河流最小生态基础流量计算方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):66-73.

[9] 李 磊,徐宗学.基于 VB 6.0 的生态基流计算软件开发与应用[J].水土保持通报,2012,32(3):145-149.

[10] 吴喜军,李怀恩,董 颖,等.基于基流比例法的渭河生态基流计算[J].农业工程学报,2011,27(10):154-159.

[11] 王雁林,王文科,杨泽元.陕西省渭河流域生态环境需水探讨[J].自然资源学报,2004,19(1):69-78.

[12] 栗晓玲,康绍忠.生态需水的概念及其计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):740-744.

[13] 辛 琛,赵婉玲.渭河中下游生态基流量计算分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(3):90-92,97.

[14] Ipswich River Fisheries Restoration Task Group. Ipswich River Fisheries Current Status and Restoration Approach[EB/OL]. <http://www.ipswich-river.org/Fish Rest Report.pdf>,2002.

[15] 舒 畅,刘苏峡,莫兴国,等.基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J].生态环境学报,2010,19(5):1151-1155.

(上接第 207 页)

[19] Lee C S, Li X, Shi W, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics[J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1-3):45-61.

[20] Beckerman B, Jerrett M, Brook J R, et al. Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(2):275-290.

[21] 邵 莉,肖化云.公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J].环境化学,2012,31(3):315-323.

[22] 李仰征,马建华.高速公路旁土壤重金属污染及不同林带防护

效应比较[J].水土保持学报,2011,25(1):105-109.

[23] 李 波,林玉锁,栾孝飞,等.宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J].农业环境科学学报,2005,24(2):266-269.

[24] 刘世梁,崔保山,温敏霞,等.路域土壤重金属含量空间变异的影响因子[J].环境科学学报,2008,28(2):253-260.

[25] 杨宝玲,郑阿宝,阮宏华.沪宁高速公路绿色通道建设对土壤重金属污染的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(1):149-151.